

**Г.К. ВОРОНОВСКИЙ**, д-р. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»,  
**К.В. МАХОТИЛО**, канд. техн. наук, с. н. с., НТУ «ХПИ»,  
**Ю.В. ПОСТУЛЬГА**

## **ОЦЕНКА ТЕМПОВ ПРИРОСТА ЭЛЕКТРООТОПИТЕЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА В БЫТУ ПРИ ПОМОЩИ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ЖИЛЫХ МАССИВОВ**

Запропоновано методику непрямого оцінювання темпів зростання електроопалювального потенціалу, що використовується побутовими споживачами для додаткового обігріву житла. На прикладі житлового масиву «Павлово поле» міста Харкова виконано синтез еталонного добового профілю електричного навантаження, з врахуванням якого досліджено динаміку змінювання електричного дотопу в нічні часи при різних метеоумовах і режимах відпуску тепла від районної котельні. Отримано оцінку річних приростів встановленої потужності побутових обігрівачів.

The technique for indirect estimation of installed capacity of household electrical convectors for additional heating is proposed. The daily electrical load profile etalon is synthesized for district "Pavlovo Pole" of Kharkiv city. Basing on synthesized etalon the dynamics of changing of nightly electrical load for additional heating is studied at various meteorological conditions and district boiler heating output. The yearly rate of household electrical convectors installed capacity growth is estimated.

**Введение.** Произошедшее в 90-х годах снижение качества работы системы централизованного теплоснабжения (СЦТ) стало причиной бурного развития альтернативных технологий отопления в быту, базирующихся на использовании электронагревательных приборов. Эти технологии уже не являются для населения просто неким подспорьем во время похолоданий, а начинают всерьез конкурировать с СЦТ, отвлекая на себя значительные материальные и финансовые ресурсы общества. Приобретение и использование населением все большего количества электронагревателей значительно увеличивает электропотребление в быту, и нынешняя инфраструктура энергетического хозяйства города с трудом выдерживает такую электрическую нагрузку.

Ярким примером пагубности этого процесса служит крупнейшая авария, произошедшая в московской энергосистеме в мае 2005 года [1]. Бурное жилищное строительство, рост интенсивности использования различных бытовых электроприборов населением увеличивало общее энергопотребление Москвы в течение последних 10 лет в среднем на 4 % в год. Однако этот процесс, как и в большинстве крупных городов на постсоветском пространстве, не сопровождался адекватным развитием городских электрических сетей. Как результат, перегрузка одной из центральных подстанций привела к охватывающей полгорода аварии, ущерб от которой оценивается в 1 млрд. долларов. Причем, эта авария произошла не зимой, а в нетипично жарком мае, и связана она с электрической нагрузкой кондиционирования, а не отопления. Можно утверждать, что, случись она в

январе, когда к электросети подключен гораздо больший парк электроотопительных приборов, последствия были бы губительнее.

Становится очевидным – если в советский период развития СЦТ при снижении отпуска тепла от источников теплоснабжения самым большим риском было «размораживание» теплосети, то теперь к нему добавляется еще и угроза паралича электроснабжения города.

Постоянно растущая мощность бытового энергопотребления заставляет изучать его уже не как самостоятельный процесс [2 – 5], а подходить к нему комплексно, увязывая рост электрической нагрузки в быту с качеством теплоснабжения жилых массивов [6]. В теперешних условиях СЦТ должна быть адаптирована не только к местному климату, но и к современным стандартам качества жизни, динамично развивающимся в условиях рыночной трансформации постсоветской экономики. Все это делает актуальной задачу исследования закономерностей развития электрической нагрузки в быту как на протяжении суток, так и на более глубоких временных горизонтах, которые позволили бы получать объективные оценки относительно темпов прироста установленной мощности электронагревательных приборов в быту.

**Постановка проблемы.** В предыдущей работе [7] была оценена пятилетняя динамика развития ночного потребления электроэнергии крупным жилым массивом. В качестве объекта исследования был выбран жилой массив "Павлово поле" города Харькова, объединяющий в себе функции спального района и делового центра. В работе был выполнен анализ ночного электропотребления этим жилым массивом за период с 1997 по 2003 год. Ночное электропотребление  $P_4$ , под которым понимается усредненная электрическая нагрузка на фидерах «ХПГЭС» в получасовом интервале между 4:00 и 4:30, было выбрано как объект исследования потому, что ночью исчезает множество факторов, влияющих на интенсивность использования населением электрической энергии днем. Например, нивелируется влияние естественной освещенности, определяющей интенсивность использования искусственного электроосвещения в жилых помещениях, кроме того, именно в это время суток электрическая нагрузка наиболее полно характеризует ту компоненту в электропотреблении, которая обусловлена электропотреблением исключительно в быту.

Результаты, полученные в [7], базируются на предположении, что ночное электропотребление в быту не подвержено влиянию каких-либо сезонных факторов. Как показал в последствие выполненный анализ, это не так. На рис. 1 представлены данные по ночному электропотреблению за несколько отопительных сезонов, полученные в результате изучения архивов энергопотребления, предоставленных диспетчерской службой АК «Харьковоблэнерго». Обращают на себя внимание следующие особенности.

Максимальная величина электрической нагрузки достигает 20 МВт, в то время как минимальная не опускается ниже 6 МВт. Пунктирной линией на графике обозначена нижняя граница диапазона variability

электропотребления. Положение нижней границы колеблется на уровне от 6,5 до 10,5 МВт. Как видно, нижняя граница имеет отчетливо выпуклую форму. В наиболее холодные месяцы зимы величина минимального ночного потребления значительно выше, чем в осенний и весенний периоды. На протяжении всего отопительного сезона изменчивость ночного электропотребления остается достаточно высокой, при этом верхнее граничное значение диапазона вариабельности в 1,5 – 2 раза превышает нижнее граничное значение для того же календарного периода.

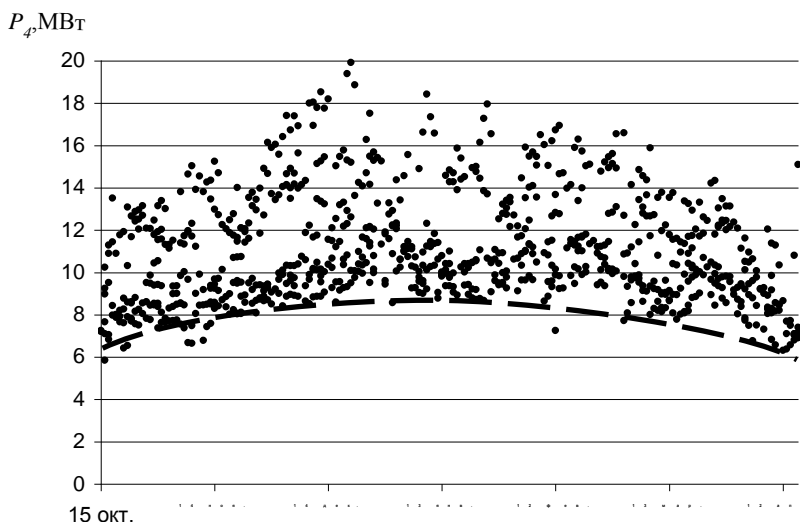


Рис. 1. Ночная электрическая нагрузка в быту за отопительные сезоны 1997–2003 гг.

Наиболее трудно объяснимым результатом анализа является то, что вопреки ожиданиям, ночное электропотребление проявляет очевидную зависимость от времени года. По-видимому, этот факт должен найти отражение и при обсуждении зависимости ночного электропотребления от наружной температуры, а также от полноты удовлетворения спроса в быту на тепло. Иначе говоря, для адекватного описания исследуемых процессов связанного потребления ТЭР мы должны перейти от категории «усредненная электрическая нагрузка» к категории «сверхпотребление электрической энергии на дотоп».

**Целью исследования** является изучение зависимости величины ночной электрической нагрузки  $P_4$ , связанной с бытовым дотопом, от ночной наружной температуры  $T$  и величины суточного отпуска тепла  $Q$  от источника централизованного теплоснабжения, в тепловом районе которого находится жилой массив. Для достижения этой цели нам пришлось предварительно

синтезировать эталонный суточный профиль электрической нагрузки для жилого массива "Павлово поле" и затем с его помощью выделить из данных по электропотреблению данные, касающиеся «сверхпотребления» электроэнергии на дотоп в ночные часы.

**Эталон электропотребления.** Для синтеза эталонного суточного профиля электрической нагрузки мы воспользовались подходом, разработанным в [6]:

$$P^3(h, z) = a_0(z)/2 + \sum_{k=1}^{10} a_k(z) \cos k\omega_0 h + \sum_{k=1}^{10} b_k(z) \sin k\omega_0 h; \quad (1)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{48}; \quad (2)$$

$$\begin{cases} a_k = C_{a,k} z + D_{a,k}; \\ b_k = C_{b,k} z + D_{b,k}; \end{cases} \quad (3)$$

$$z = 1,9975151 - 0,9833334 \sin(0,0368243l + 1,5856173) + 0,0007554l^2, \quad (4)$$

где  $h$  – номер получасового интервала в сутках,  $h \in [0; 48)$ ;

$z$  – параметр, описывающий продолжительность светлого времени дня;

$C_{a,k}, D_{a,k}, C_{b,k}, D_{b,k}$  – коэффициенты, рассчитываемые для жилого массива;

$l$  – количество целых дней до 22 декабря. Здесь принято, что для периода с 15 октября до 22 декабря  $l \leq 0$ , а для периода с 22 декабря до 16 апреля  $l \geq 0$ ,  $l \in [-68; 115]$ .

В соответствии с методикой синтеза эталонного профиля мы отбираем из архива электропотребления данные за разные годы, которые удовлетворяют условию принадлежности даты к одной из зон продолжительности светлого времени дня. Весь отопительный сезон для удобства синтеза эталонов разбит на 11 зон. Принадлежность определенного дня к одной из зон определяется по формуле:

$$Z = \lfloor z \rfloor, \quad (5)$$

где  $\lfloor \cdot \rfloor$  – округление до ближайшего меньшего целого;

$Z$  – номер зоны.

Величина  $z$  определяется с помощью выражения (4), полученного для Харькова как аппроксимация данных астрономических наблюдений [8].

Из полученной выборки отбрасываем все дни, которые несут неточную информацию (неполный архив, сбой системы учета электропотребления и т.п.). На следующем этапе из базы данных электропотребления, отбираем дни, соответствующие минимальному суточному потреблению. В соответствии с условиями нашего исследования из полученных данных проводим выборку данных только за рабочие дни. Наконец, по полученным данным с помощью метода наименьших квадратов были получены значения настроечных коэффициентов  $C_{a,k}, D_{a,k}, C_{b,k}, D_{b,k}$  (см. табл. 1).

Таблица 1

| №  | $C_{a,k}$    | $D_{a,k}$    | $C_{b,k}$    | $D_{b,k}$    |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0  | -1,155481061 | 29,220727273 | 0            | 0            |
| 1  | 0,087384143  | -1,334529060 | 0,156237256  | -3,761555625 |
| 2  | 0,095446518  | -1,212519975 | -0,038931579 | -1,789301110 |
| 3  | -0,066537732 | 0,073329029  | -0,068174715 | 0,483349753  |
| 4  | -0,043541974 | 0,093391314  | 0,040664279  | -0,056229679 |
| 5  | 0,030580952  | -0,299393505 | 0,021603343  | -0,099473938 |
| 6  | 0,010430631  | -0,089855288 | -0,010826009 | 0,023651865  |
| 7  | -0,008564423 | 0,110265416  | -0,001449177 | 0,003364318  |
| 8  | 0,000515151  | -0,002276515 | -0,000459256 | 0,018993512  |
| 9  | -0,000558902 | -0,009640673 | -0,001017609 | 0,006778918  |
| 10 | -0,000610655 | -0,003420125 | 0,003940635  | -0,053259162 |

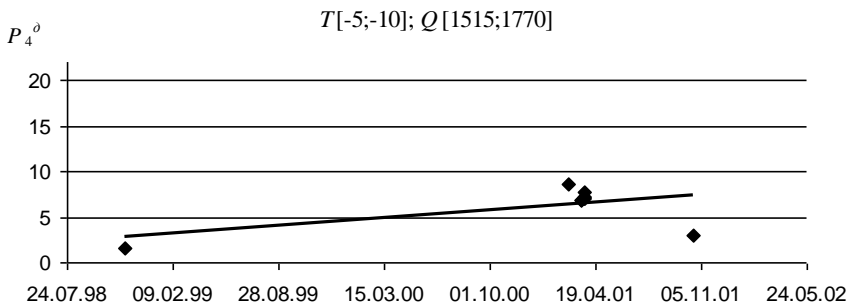
**Исследование динамики ночного электродотопа.** Синтезировав эталонный суточный профиль электрической нагрузки в быту, мы получаем возможность выделить из совокупного ночного электропотребления составляющую  $P_4^0$ , направляемую населением на дотоп:

$$P_4^0 = P_4 - P_4^3;$$

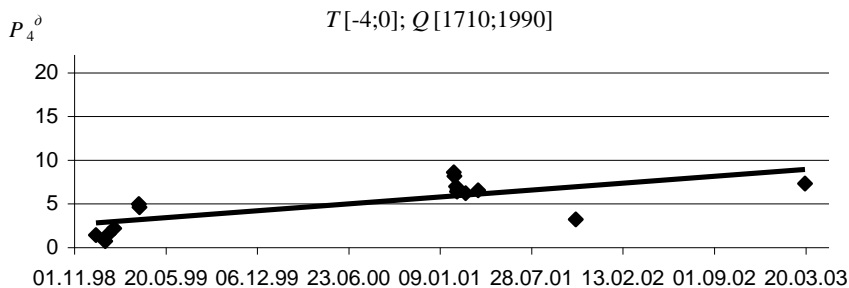
$$P_4^3 = P^3(8, z).$$

На рис. 2 представлены наиболее характерные графики, показывающие изменение электродотопа в течение 5 отопительных сезонов 1997–2003 гг. Как и в работе [7], на этом рисунке выполнено разделение данных по диапазонам изменения ночной температуры воздуха  $T_{\text{нар}} \in [T_j^{\min}, T_j^{\max}]$ , где  $j = \overline{1, 4}$ , изменения величины суточного отпуска тепла  $Q \in [Q_k^{\min}, Q_k^{\max}]$ ,  $k = \overline{1, 7}$  от котельной жилого массива "Павлово поле". Границы диапазонов температуры воздуха выбраны так, чтобы отображать наиболее яркие типы зимней погоды в Харькове: мороз  $[-5; -10]$ , заморозки  $[-4; 0]$ , снегопад  $[-3; 3]$  и оттепель  $[1; 5]$ . Диапазоны изменения величины суточного отпуска тепла  $Q$  выбраны для каждого описанного типа погоды так, чтобы представлять различное качество отопления. Размер каждого диапазона изменения  $Q$  не превышает 400 Гкал.

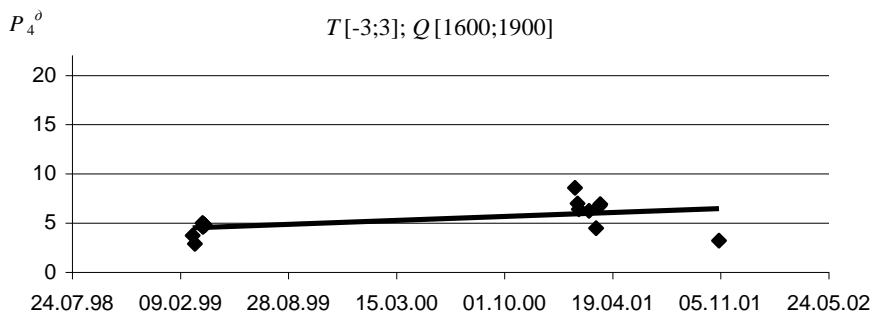
Для численной оценки тенденций роста ночного электродотопа и прогнозирования его дальнейшего изменения был выполнен регрессионный анализ данных.



a)



б)



в)

Рис. 2. Развитие электроотопительной составляющей в ночной нагрузке за 5 лет

В табл. 2 приведены параметры построенных линейных трендов для величины общего ночного потребления  $P_4$  (по [7]) и ночного электродотопа  $P_4^o$ :

$$\tilde{P} = Ay + B,$$

где  $y$  – четырехзначный номер года;

$\tilde{P}$  – оценка величины электропотребления, МВт.

Таблица 2

| № | Диапазоны изменения |              | Параметры уравнения тренда электропотребления |          | Параметры уравнения тренда электродотопа |          |
|---|---------------------|--------------|---|----------|--|----------|
|   | $T$                 | $Q$          | $A$   | $B$      | $A$                                      | $B$      |
| 1 | [−5; −10]           | [1515; 1770] | 0,7962  | −1580,78 | 1,566                                    | −3127,61 |
| 2 | [−5; −10]           | [2055; 2300] | 0,8049  | −1598,04 | 1,2676                                   | −2531,52 |
| 3 | [−4; 0]             | [1710; 1990] | 1,0591  | −2106,33 | 1,6399                                   | −3275,22 |
| 4 | [−4; 0]             | [2026; 2200] | 0,6355  | −1259,63 | 1,0348                                   | −2066,47 |
| 5 | [−3; 3]             | [1600; 1900] | 1,1952  | −2379,13 | 0,7316                                   | −1457,98 |
| 6 | [−3; 3]             | [2000; 2300] | 0,5217  | −1032,25 | 0,8196                                   | −1636,17 |
| 7 | [1; 5]              | [960; 1200]  | 0,537   | −1064,77 | 1,6704                                   | −3337,73 |

Для каждой из выборок данных электродотопа  $P_4^o$  была определена величина достоверности аппроксимации  $R^2$ . Сравнивая ее с результатами построения трендов  $P_4$  в [7], можно отметить, что значения  $R^2$  находятся в том же диапазоне – от 0,2 до 0,9. Также видно, что наклон линий тренда электродотопа (коэффициент  $A$ ) по сравнению с трендами общего электропотребления в большинстве случаев увеличился (см. табл. 3).

Таблица 3

| № | Знак изменения величины коэффициента $A$ |
|---|--|
| 1 | +  |
| 2 | +  |
| 3 | +  |
| 4 | +  |
| 5 | −  |
| 6 | +  |
| 7 | +  |

Таким образом, сравнивая с [7], можно отметить, что оценка динамики изменения ночного электродотопа, показывает еще более тревожные тенденции роста электроотопительного потенциала у населения по сравнению

с тем, что можно было бы ожидать, исходя из данных общего электропотребления жилым массивом.

Анализируя параметры трендов в диапазонах 2, 4 и 6 (см. табл. 2), можно отметить, что прирост использования электроотопления произошел не только для периодов холодов или при низком уровне отпуска тепла, но и при достаточно высоких значениях  $Q$ . Это отражает тот факт, что, однажды вложив средства в обогреватель, бытовой потребитель прибегает к его использованию на систематической основе. К тому же, наметившийся рост благосостояния населения позволяет жильцам использовать и оплачивать электроотопление и при хорошем качестве теплоснабжения жилого массива с целью доведения температуры в своей квартире до индивидуально выбираемого комфортного уровня.

**Выводы.** В работе синтезирован эталон бытового потребления электрической энергии в рабочие дни для жилого массива "Павлово поле" г. Харькова, и выполнены исследования изменения избыточной компоненты в ночной электрической нагрузке за период с 1997 по 2003 годы.

Результаты анализа показывают, что рост величины ночного электродотопа происходит устойчиво во всех диапазонах отпуска тепла, включая как заниженный, так и достаточный уровни. Это является доказательством происходящего на практике процесса аккумуляирования населением электроотопительного потенциала. То есть, жители с каждым годом не только приобретают новые электроотопительные приборы, но и используют электроотопление даже при высоком уровне отпуска тепла.

Выполненный предварительный количественный анализ динамики прироста электрических нагрузок дает основания считать, что темпы накопления электроотопительного потенциала в быту составляют 30–50 % в год по отношению к уровню 1997 года.

**Список литературы:** 1. Байко С. Дефіцит потужностей // Електротема. – № 18 (74). – 27 вересня – 10 жовтня 2005 р. 2. Бахмутский Е.Е., Иванов И.И. и др. Моделирование нагрузок электрических бытовых приборов и жилых комплексов // Бытовая электротехника. – М.: Информэлектро, 1974. – Вып. 4 (23). – С. 3–7. 3. Антонов Н.В. Анализ различия в бытовом электропотреблении России и США // Изв. АН, Энергетика. – 1995, № 4. – С. 94 – 102. 4. Почебут Д.В. Характеристики бытового электропотребления // Изв. вузов. Электромеханика. – 1996. – № 3–4. – С. 95–96. 5. Кушнарев Ф.А., Надтока И.И., Почебут Д.В. Моделирование бытового электропотребления // Изв. вузов. Электромеханика. – 2000. – № 4. – С. 87–90. 6. Вороновский Г.К. Усовершенствование практики оперативного управления крупными теплофикационными системами в новых экономических условиях. – Х: Изд-во «Харьков», 2002. – 240 с. 7. Вороновский Г.К., Козлоков А.В., Орловский Г.И., Постульга Ю.В. Исследование ночного электропотребления жилым массивом // Техн. електродинаміка. Тем. випуск. 2005. 8. Долгота дня // БСЭ. – 2-е издание. – М., 1957. – Т. 15. – С. 19.

*Поступила в редакцию 11.10.2005*